



TITLE:

<講演1>エネルギー材料が支える未来社会 -主役? それとも脇役?-

AUTHOR(S):

木村, 晃彦

CITATION:

木村, 晃彦. <講演1>エネルギー材料が支える未来社会 -主役? それとも脇役?-. 京都大学附置研究所・センターシンポジウム: 京都からの提言 -21世紀の日本を考える (第6回)- 「混沌の時代に光を探る」 2012, 6: 3-12

ISSUE DATE:

2012-03-01

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/179449>

RIGHT:

隣の北朝鮮、東南アジア、そしてアフリカのなどの発展途上の国々は陸地のほとんどが暗くなっており、地球上には電気を十分に使えてない人々がまだまだたくさんいるということが判ります。今後、これらの発展途上国において十分なエネルギーを使うことになると、今度は資源の枯渇やCO₂が排出されるという問題が出てまいります。図2は、人類の化石エネルギーの消費とCO₂の排出の関係を示したもので、大気中のCO₂の濃度の年次変化を示しています。産業革命と第二次世界大戦以降、急激に大気中のCO₂が増えています（線図）。棒グラフはどういった化石燃料からCO₂が排出されているかを示しており、産業革命以降は、蒸気機関の発明で石炭が大量に使われました。第二次世界大戦以降は、石油が大量に使われたということを示しています。各種発電プラントから放出されるCO₂量を比較すると、石炭・石油・天然ガス火力では化石燃料を燃やすことによって出てくるCO₂の量が多くなっています。また、発電プラントを建造する際にもCO₂は発生しますが、その量は各発電プラントにおいて大きな差は無いと言われています。太陽光、風力、地熱、原子力、水力発電においてはCO₂の排出量が非常に少ないことがわかります。

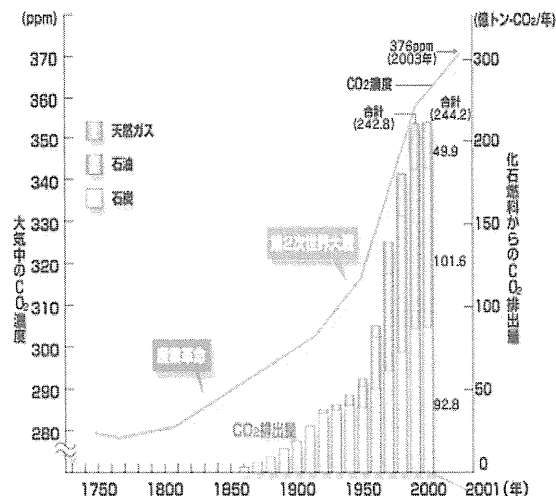


図2：大気中のCO₂濃度の年次変化（出典：環境省資料、気象庁資料、エネルギー・経済統計要覧2004年版の温室効果ガス世界資料センター）

これまでの我が国の発電量の実績と今後の見通しを図3に示します。これは震災前は見通しです。このように発電量は年々増えてきているということがわかると思います。その中身を見ますと、最近では原子力が30%前後、石油が10%、石炭が20%、天然ガスが25%、水力が10%、そしていわゆる新エネルギーと言われる再生可能エネルギーは、たった1%しかないわけですね。非常に少ない。震災前は見通しは、2020年までに原子力を42%まで増やしようということでした。でもこれは、今回の震災がありまして、私見ですが、原子力は現状維持の30%、そのかわり再生エネルギーを10%まであげようというのが、最近の考え方になっているようです。

それでは、どんな再生可能エネルギーがあるのでしょうか。経産省所管の独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）」でまとめた再生可能エネルギー技術白書（平成

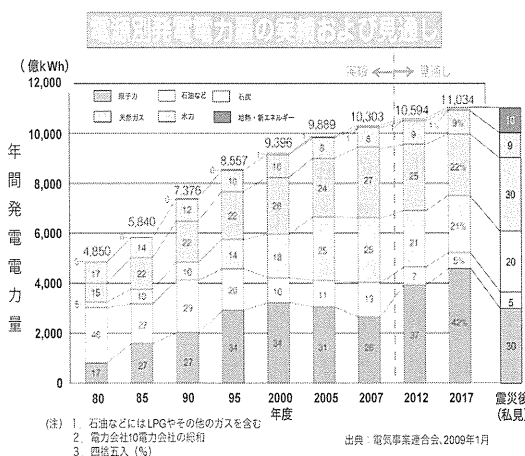


図3：我が国の発電電力の実績と見通し

22年4月)によれば、太陽光発電、風力発電、バイオマスエネルギー、太陽熱発電、波力発電等様々な再生可能エネルギーについて、その技術をとリまく現状、技術ロードマップ計画といったものが議論されています。報告書では、種々の再生可能エネルギーの中で、太陽光発電、風力発電、バイオマスエネルギーを3つの主力エネルギーと定めています。そこで、この主力となる再生可能エネルギーの現状と課題についてまとめてみました。

まず、太陽光発電、国内最大規模の発電所が堺にございます。ここではシステム一基あたり20haの太陽光パネルが敷き詰められています。これだけのもので一般家庭、約3000世帯分の電気を賄うことができます。このシステムで、例えば原発一基分相当の電力をまかなうためには、約300基が必要になります。これは伏見区の全域をパネルで埋めるくらいの面積に相当します。ここでの課題は、太陽電池の材料になるシリコン結晶の量産体制で、これをきちんとしなくてははいけません。それと発電効率の上昇と電池の開発、生産コストの問題、土地の価格、日照時間など、多くの課題が残されています。

風力発電につきましては、実は福島県郡山には、布引高原風力発電所という最大級の発電所がございます。郡山から会津にかけての高原です。ここでは33基の風車がそびえ立っています。これで賄えるのは35000世帯分の電気です。これを原発一基分に考えますと1450基の風車が必要になってまいります。ここでは、耐久性の問題や音響、生体への影響、それと風任せといったところが課題になります。

3つ目のバイオマスプラントは、川崎に最大級の本質バイオマス発電所がございます。これは、8900世帯分の電気を一基で賄うことができます。これも原発1基分に換算しますと110基必要になってまいります。問題なのはCO₂を排出する施設が多いということで、CO₂を減らすことにはなっていないプラントが9割に及んでいるそうです。一方、エタノールを同時に作れるのがメリットです。ただ、毎日500トンの本質バイオマスを燃料として確保しなくてはならないという経済性の問題があります。先ほども示しましたが、こういった再生可能エネルギーは全体の発電量の1%というのが現状です。

そこで今、基幹エネルギーをどうすればよいか。これは私個人の意見でありまして、他にも多くの考え方があるかと思ひます。ここでは一つの意見として聴いていただきたいと思ひます。

現状をみますと、やはり未曾有の災害の復旧・復興を促進する必要がある、電力は必要になってきます。しかも今、必要です。しかし、一部の原発が停止状態になっており、代替えのエネルギーは火力しかございません。依然としてCO₂排出の問題があります。一方、再生可能エネルギー

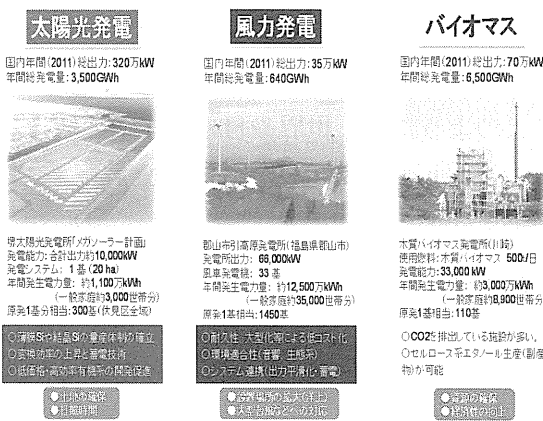


図4：主力となる再生可能エネルギーの現状と課題

の開発。これには時間がかかります。政策と技術革新を進めるためには、国の支援の下で中・長期的に推進するというのが現実的かと思います。となりますと、しばらくは原子力に依存しなくてはならない。そうすると問題は原発が安全か？ということになります。皆さんご存知かと思いますが、福島第一原発は、何故、制御不能になったかといいますが、津波により冷却機能が喪失したことが原因だと言われています。一方、福島第一原発の1号機から6号機までの運転開始年を調べてみますと、1970年代初頭など、結構古い発電所があります。私が特に注目しておりますのは、震源地に近い女川原発がなぜ制御できたのかという点です。もちろん冷却水の循環機能は維持できたというのが答えになりますけれども、何故そういうことができたのか。そこで着目したいのが、女川原発1、2、3号機は比較的新しい発電所であるということです。違いは津波だけなのか？私はそうとは思っておらず、やはり器材の高経年化、材料劣化が問題になっていたのではないかと考えています。

というわけで、私見ではありますが、災害復旧のための原発依存の現状維持は免れないでしょう。1979年以降に運転を開始した比較的新しい原発は、津波対策が講じられれば速やかに運転を継続してよいと思います。並行して、再生可能エネルギーの普及に努めるというのがよろしいかと思います。

このように今、世界や日本では増え続ける大気汚染、エネルギーの不足が問題になっております。エネルギー理工学研究所ではゼロエミッション、脱CO₂エネルギーの研究拠点として研究活動を進めておりますが、私はこの活動の中でエネルギー材料の研究をしています。エネルギー材料といいましても色々ございまして、図5に示しますように、電子エネルギー材料としては、太陽電池材料あるいはLED発光ダイオード等がございまして、化学エネルギー材料の括りでは、水素製造・貯蔵用の材料、燃料電池、リチウムなどの二次電池材料といったものがございまして、大型発電プラント用の材料としては、例えばガスタービン用の耐熱材料、超臨界圧石炭火力材料、原子力材料といったものがございまして、エネルギー輸送に関連しては、超伝導材料とか永久磁石材料などがございまして、これらの材料は全てこれからの社会のエネルギーや産業を根底から支える材料でありまして、明るい



図5：様々なエネルギー材料

未来を支えると期待されています。これらの様々なエネルギー材料の中から、今日は、超々臨界発石炭火力発電材料あるいは原子力材料として期待されている「スーパー ODS 鋼」の開発の状況、それと世界最強の永久磁石「ネオジウム磁石」についてご紹介いたします。

エネルギー材料とCO₂の削減の関係について述べておきます。たとえば、火力発電所の運転

温度を約50℃上昇させますと発電効率が5%上昇し、それに伴いCO₂の削減量が3%に及ぶと試算されています。原子力はCO₂を排出しないエネルギーではありますが、やはり安全利用が第一です。こうしてみますと、高温でより優れた耐久性を持つ材料が必要になってくるということでございます。実はこの様に、材料「マテリアル」は、こういった大きなプラントを見えないところで支えているわけです。

材料の専門的な話に入る前に、まずナノスケールの世界、具体的に言いますと（図6）原子を覗いてみます。スケールを表す言葉に、ギガとかナノと呼ばれる大きさを示す単位があります。ナノメートルというのは10のマイナス9乗メートルのことで、非常に小さいスケールです。その反対、プラス9乗メートルは非常に大きいスケールを示しています。例えば人の身長は100万倍、これはメガ倍とも言われますが、非常に大きいということはわかりますが、具体的にはイメージできないですね。ただ、これが日本列島の長さだとか、地球の直径の4分の1に相当する大きさと言われるとなんとなくわ



図6：ギガメートル(10⁹m)からナノメートル(10⁻⁹m)まで

かってくる。そうしますと、ギガはこの100万倍のさらに1000倍。10の10億倍ということになりますので、1ギガメートルは太陽の直径の約10倍の大きさになります。

今度は逆に小さい方を見てみます。10分の1。100分の1。1000分の1。10の9乗分の1…これがナノメートルと呼ばれるものです。ここでは、いわゆるナノの世界というものが広がっていきまして、例えば髪の毛の直径は、約100万分の1メートル。そして金箔の厚さは、1000万分の1メートルです。ナノになりますと、原子の大きさということになります。よく材料のナノテクノロジーといわれていますが、それは大体「10のマイナス9乗から10のマイナス7乗の範囲のスケールで、材料の加工や組織等を制御し、これまでにない性能や機能を付与する技術」と言えると思います。

原子を覗いてみる前に、「結晶格子」ということについて説明いたします。この格子といいますが、皆さんの周りにもございまして、例えば格子戸、千鳥格子模様、あるいは市松模様。こういったものは規則正しく並んでいます。実は金属結晶というのは原子がこのような規則正しく配列されておりまして結晶格子を作っています。電子顕微鏡で倍率を上げていきますとこのように格子模様が見えてきます（図7右下）。これは、実は原子の並びでして、規則正しい並びの中に、あるところを境にちょっと並び方が違っていることがわかります。間隔が違っているし、角度も違っています。つまり、ここに境界があるわけです。こういった境界が非常に微細に数多く存在することで材料の性能が上がったり、新しい機能が発現したりするわけです。これらは新素材の

開発に非常に重要で、これを制御するのが材料ナノテクノロジーと呼ばれるものです。

それでは次に、「スーパー ODS 鋼」の開発についてご紹介いたします。この開発研究は、COBELCO 科研（神戸製鋼所）との産官学連携事業として実施致しました。この開発の目標は、発電システムの運転温度の上昇による高効率化を可能にし、かつ長寿命の耐熱材料を開発することです。長寿命の耐熱材料とは、高温で強く、高温で長時間錆びにくく、原子力プラントの場合

は長時間の放射線照射にも耐える、ということが要求されます。ところが、これらの全てを満足させる既存の材料は、実在しません。そこでこれらの材料要件を全て兼ね備えた革新的な材料として、「酸化物分散強化鋼」に着目しまして、新しい酸化物分散強化鋼「スーパー ODS 鋼」の開発に挑んだわけでありました。酸化物分散強化鋼とは、文字通り、ある鋼に酸化物を分散させて強化した鋼です。この材料の組織を見ますと、このように球状の組織が多数見えてきます。これが酸化物粒子です（図8左下）。この鋼の場合は、イットリウムという酸化物が高密度に微細に分散されています。これはさらに拡大したもので（図8右下）、原子の並び、すなわち結晶格子が見えています。こういった境界面を数多くつくることで非常に放射線に強い材料が出来上がりました。

このように、ODS 鋼というのは直径が5ナノメートル以下の酸化物粒子を高密度かつ均一に分散させることで高温強度を上昇させた先進鉄鋼材料と言えます。この ODS 鋼のつくり方ですが、通常金属材料というのは溶かして作りますが、ODS 鋼の場合は溶かしません。粉末冶金法と言いまして、粉をかき混ぜて混合させます。これを管に入れて、溶けない温度で加工して、最終的に管状に仕上げます。この粉末冶金法を用いることが重要な鍵となっています。こうして、特性の良い ODS 鋼を開発することができました。

高温での強度を示す指標としてクリープ破断時間というのがございます。これは、図9に示す

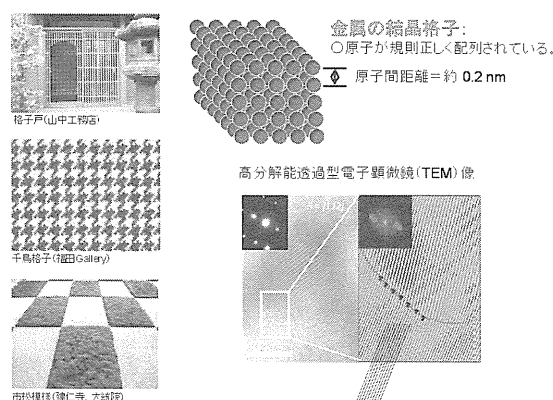


図7：金属の結晶格子と原子像の直接観察

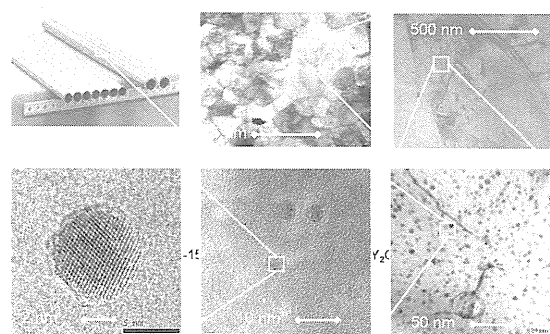


図8：酸化物分散強化鋼
(Oxide dispersion strengthened steel: ODS steel) の組織

(1) 高温で強い！

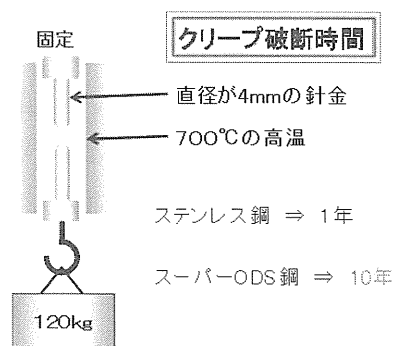


図9：クリープ強度

ように、例えば直径が4ミリの針金に120kgのおもりをぶら下げて700℃の高温に置いておきますと、時間が経つにつれて伸びて破断してしまいます。これまでのステンレス鋼は、一年しかもちません。しかし、我々が開発したスーパー ODS 鋼は10年もちます。つまり寿命が10倍になっているということです。

それと、錆びにくいということです。超臨界圧水中（510℃、250気圧）という非常に腐食性の高い環境下での腐食試験を行いますと、従来の材料は腐食量が大変大きくなりますが、スーパー ODS 鋼はこの腐食量が非常に小さく、ステンレス（不銹）鋼、これはさびない鋼と漢字では書きますけれども、それよりも耐食性が良くなっています。もうひとつ耐食性の点で言いますと、現在、核融合炉の開発が国際的に進められていますが、この核融合炉を何で冷やすか、いろんな冷やし方があります。超臨界圧水、あるいは溶融塩、液体鉛、ヘリウムガスといったもので冷やすことが提案されています。液体鉛は、鉄を非常によく溶かしてしまいます。650℃で1万時間、液体鉛の中に放置しておきますと、鉄-クロム合金製の試験片の半分が溶けてしまいます(図10)。これがスーパー ODS 鋼ですと角までしっかり残って全く溶けない。非常に耐食性が良くなっておりまして、これは、超臨界圧水の場合もそうですが、このスーパー ODS 鋼に添加されているアルミにより、この材料をつくる過程において自然に材料表面に形成される非常に薄いアルミナ（アルミの酸化物です）酸化皮膜のおかげです。このアルミナというのは非常に耐食性が良く、一旦形成されると、その後の腐食が進まなくなります。

ODS 鋼の最も特徴的な性質は、放射線に耐えるということです。普通材料は、原子炉で照射しますと図11のように、引張伸びが著しく減少してしまいます。これを照射脆化と呼んでいます。ところがスーパー ODS 鋼ですと伸びが減りません。つまり脆くなりません。それから、従来のステンレス鋼では、照射量を増やしていきますと、途中から急激に寸法変化が大きくなってしまいます。10%も膨らんでくるのです。一方、スーパー ODS 鋼は、急激な増加を示しません。非常に安定しているということです。こうして、非常に高温に強く、高温でも錆びにくい、しかも放射線に耐える材料ができあがりました。

さて、この材料の用途は、といいますと、一つは車体の軽量化があります。つまり強度が今までの材料に比べて2倍上がっていますので、例えば厚さを2分の1にすることができます。つま

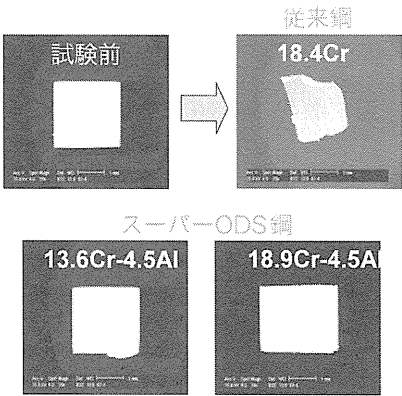


図 10：液体鉛中での腐食（650℃、1 万時間）

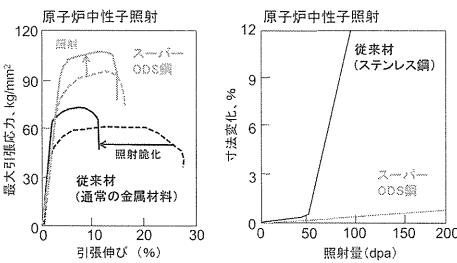


図 11：ODS 鋼の優れた耐照射性

り軽くできます。それと、鉛電池用の隔壁セル、あるいは火力発電プラント用の配管。あるいは原子力材料、核融合材料としての利用が期待されています。

それでは次に、世界最強の永久磁石の話に移りたいと思います。この世界最強の永久磁石はネオジウム磁石と呼ばれていまして、近年、ハイブリッド車のモーターへの応用開発研究が進められています。図12は、永久磁石の強さの変化を年代で示したものです。このように急激に上がってきています。実は、このネオジウム磁石は日本人が発明しております。今現在、我々の研究室と産学官連携の共同研究を行っているインターメタリック社の佐川社長が開発したものです。この強さの指標は専門用語で言いますと、磁化曲線で示すことができまして、磁化曲線で囲まれる面積が大きければ大きいほど良い磁石になります。元素が決まりますと磁束密度というのがだい

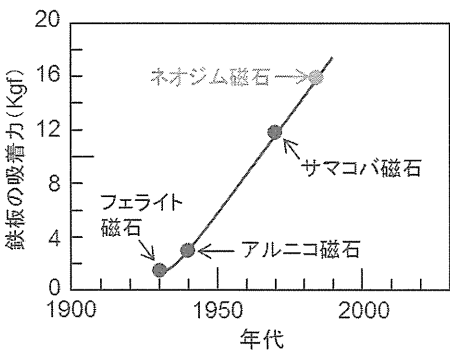


図12：永久磁石の強さの変遷

たい決まってきますが、保持力に関しては、材料の組織を変えることで変化させることが可能です。ですから永久磁石を開発している研究者は、この保持力を上げる努力を今まで重ねてきました。最近、このネオジウムをハイブリッド車のモーターに適用するに当たり、大きな問題が出てまいりました。それは、モーターは使用中に摩擦で温度が200℃に上がってしまい、磁力が低下してしまい、モーターの性能が落ちてしまいます。そのために佐川さんはどういうことをしたかといいますと、ディスプロシウムという新しい元素を添加して、鉄ネオジウムディスプロシウム合金を開発しました。ところが、このディスプロシウムをネオジウム磁石に添加しますと保磁力は高まりましたが、磁石の力が弱くなってしまいました（図13参照）。それと、このディスプロシウムという元素は自然界に存在する比率が非常に小さく、このネオジウムの10分の1しかありません。ネオジウム自体も希土類元素と言われていまして、非常に少ない元素です。ですから、このディスプロシウムあるいはネオジウム、特にこのディスプロシウムの使う量を減らしていかななくてはならないという大きな問題が生じていました。

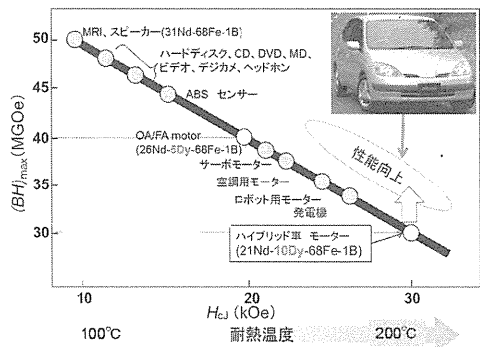


図13：磁石の強さと温度の関係

皆さんもレアアースメタルという言葉を目にしたことがあると思います。最近、材料科学の世界では元素戦略という言葉が飛び交っています。これはどういうことかといいますと、地上にあまり存在しない元素はできるだけ使わないようにしましょう。ですから、代わりの元素を見つけましょう（代替：Replace）。あるいは使う量を減らしましょう（減量：Reduce）。今まで5%添加していたものを2%で同じ性能を出すようなものにしてあげましょう。あるいはそれをリサイクルしましょう

(循環:Recycle)。使う量は規制しましょう (規制:Restriction)。これらは、4R と呼ばれています。地殻に存在するネオジウムやディスプロシウム量は、鉄に比較すると、非常に少なく、価格にしますと鉄の数百倍と非常に高額になります。いずれにせよ、とにかくディスプロシウムは少なくしたいというのが研究の目的でございます。そこで、この問題を材料組織学に基づいて、如何に解決したかについてこれから紹介します。

基本的な考え方としまして、ディスプロシウムを偏在させる処理を考えたということです (図 1 4 参照)。ネオジウム磁石というのは、複数の結晶が集まってできています。これは粉末冶金から作りますので、例えばこれが一つの粉末と考えてもらってもよいです。この粉末と粉末との間にだけ、ディスプロシウムを入れる方法を考えたわけです。これにより、磁力を増加させることができました。では、どうやって行ったかという、粒界拡散処理を行います。この処理は、図 1 4 の右図に示すように、まず磁石の表面にディスプロシウムを塗布して温度を上げてやります。そうしますとディスプロシウムは粒界と呼ばれるところだけに速く広がって行きます。こうして、粒界だけにディスプロシウムを分散することができたというわけです。従いましてディスプロシウムの使用量は非常に少なくなります。100分の1、いや、もっとそれ以上に少なくなっています。

以上、これまで2つの材料開発の例を示しました。材料の開発の鍵は何かと考えますと、従来のほとんどの金属材料というのは溶かして混ぜる工法でつくられています。溶かすには高温にする必要があります。ところが、高温にしますと粗い組織の材料になってしまい、優れた材料性能が得られません。ところが、スーパー ODS 鋼やネオジウム磁石は、いずれも粉末冶金法で作ります。これは溶かさないで混ぜるという方法で、いわば低温プロセスと言うことができます。こうなりますと非常に細かい組織の材料を作ることが可能です。この低温製造プロセスは学術的には非平衡状態を創製し易いプロセスと考えられています。この非平衡材料科学を適用すれば従来の平衡論からは予測できないものが創製される可能性がありますし、同じ合金成分でも異なる性能を持ったものが生まれる可能性も出てきます。新しい機能の発現も期待できます。

非平衡状態をつくる方法としては、機械的混合 (ODS 鋼のように粉末を混ぜ合わせて作る)、急冷法、高エネルギー粒子線注入法、レーザー照射法、こういったものが考えられ、エネルギー理工学研究所では、イオン照射加速器やレーザー発生装置を使ったりして材料の開発を進めています。

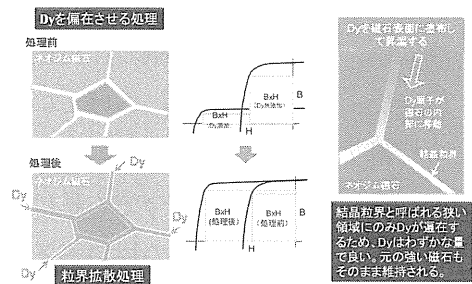


図 1 4 : 少ないディスプロシウム量で目標の磁力を達成する手法の開発

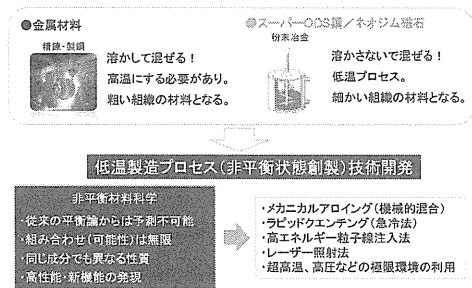


図 1 5 : 材料開発の鍵

るところでございます。

そろそろ時間になりましたので、私の話をまとめさせていただきます。まず、震災からの復旧・復興を促進するためにはエネルギー供給の急激な方向転換は不可能でございます。原子力エネルギーを安全利用することが効果的と思います。材料開発におけるナノテクノロジーの多くは、非平衡状態の創製によるものであり、プロセス法の開発が鍵となっています。材料開発はエネルギーの高効率、安全利用に貢献し、長期的には元素戦略と材料科学の革新が期待されています。

最後に、私の話の副題にあげている、材料は、主役？それとも脇役？ということですが、従来から材料テクノロジーというのはクイーンテクノロジーであってキングにはならないということがよく言われています。今でも私はそう思っています。ただし、大事なことは主役であろうが脇役であろうが、それぞれの材料がその役割を果たさなければ、どんな建造物やシステムも機能しないし、エネルギーを効率よく生み出すことはできません。したがって、やはりそれぞれの役割をきちんと果たすことが大事であって、主役も脇役もないだろうというのが、私の考え方でございます。会場の皆さんは、どのように感じられたでしょうか？これで、私の話を終わりにしたいと思います。